第40卷 第11期
2023年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 11
Nov. 2023

关川河上游水沙变化特征及其对降水和水保措施的响应

王晓雨[1]，马 瑞[1]，张 富[1]，胡彦婷[1]，王玲莉[2]，蒋承洋[3]，陈素娥[1]

（1. 甘肃农业大学林学院，甘肃 兰州 730070；2. 甘肃林业职业技术学院林业工程学院，甘肃 天水 741000；
3. 甘肃智富瑞达生态环境工程有限公司，甘肃 兰州 730070）

摘 要：为进一步探讨降水量和水土保持措施对径流泥沙的影响，深入了解黄河中小河流水沙变化驱动因素，采用M-K检验、Morlet小波、线性回归和结构方程模型等方法，对1957—2021年关川河上游降水量和水土保持措施面积变化及其对径流泥沙的作用机理和过程进行了研究。结果表明：年降水量呈不显著减少趋势（$P>0.05$），径流模数和输沙模数呈显著减少趋势（$P<0.05$），水土保持措施面积呈增加趋势。径流模数、输沙模数对降水量的响应由强转弱，对水土保持措施的响应逐渐增强；降水量和水土保持措施影响水沙变化的关键路径是“水土保持措施面积→径流模数”，其次是“水土保持措施面积→径流→输沙模数”；再次是“降水量→径流模数”，最后是“降水量→径流模数→输沙模数”；降水量对水沙变化的总效应分别为0.42和0.38，水土保持措施面积对水沙变化的总效应则分别为-0.72和-0.65，影响流域水沙变化的主要因素是水土保持措施面积，次要因素为降水量。

关键词：水沙变化；水土保持措施；结构方程模型；关川河上游

径流量、输沙量是河川径流重要的水文要素[1]，是评估区域水文环境动态变化的重要指标，也是流域治理决策的主要依据。随着全球范围内气候变化和人类活动的加剧，流域水文过程受到了不同程度的影响，进而影响流域输沙量[2-5]。黄河是世界上含沙量最大的河流，黄河水沙关系变化影响到流域内社会、经济、生态环境等众多领域，是学术界关注的热点[6-8]。Zheng等[9]通过对比黄土高原122个水文站径流泥沙数据发现2008—2016年平均径流量和输沙量相比1971—1987年分别减少22%和74%，并运用归因分析方法认为人类活动的贡献率>72%；Zhang等[10]运用回归分析方法研究祖厉河流域1955—2013年的水沙演变规律，结果发现降水量、径流量和输沙量呈逐年减少趋势；Rustomji等[11]通过分析1950—2000年黄土高原流域的水沙关系，发现在高径流条件下含沙量受水土保持措施影响呈大幅度降低；Zhang等[12]研究发现，不同时间尺度的水沙关系受生态建设等水土保持措施的直接影响，不同径流的含沙量均呈显著降低趋势；廖建华等[13]从高含沙水流等角度分析水沙行为特征，结果表明水土保持措施及植被改善降低了高含沙水流发生频率；赵娟[14]采用M-K和P突变点检验、双累积曲线法分析了黄河支流佳芦河、秃尾河流域水沙关系变化特征及与人类活动的影响关系，结果表明人类活动对径流量和输沙量的贡献率大于降水量对其的贡献率；穆兴民等[15]在变量共线性分析基础上提出了流域降水量标度和水土保持标度及其计算方法，并建立流域降水-水土保持-径流统计模型，在佳芦河和秃尾河流域水土保持使流域径流量平均减少10%~22%，佳芦河降水变化及水土保持措施影响分别为25%和75%，而秃尾河分别为35%和65%，同时穆兴民等[16]研究表明，人类活动是20世纪70年代特别是进入21世纪以来黄河泥沙减少的主要原因，20世纪黄河泥沙减少主要是由于水利水土保持工程的拦蓄作用，21世纪以来的减少主要为规模化恢复植被的坡面阻控作用。径流泥沙的变化受

收稿日期：2023-05-23； **修订日期：**2023-06-28
基金项目：甘肃省优博基金（22JR5RA840）
作者简介：王晓雨（1999-），女，硕士研究生，主要从事水土保持与荒漠化防治研究. E-mail: 1306162654@qq.com
通讯作者：张富. E-mail: fuzhang001@163.com

多种因素影响且过程复杂，以往研究多集中于不同因素对径流泥沙的直接影响分析，对其作用机理和路径分析则较少。结构方程模型作为一种验证性多元统计分析技术，有助于观测降水量、水土保持措施面积与径流输沙之间的直接影响、间接影响、总效应及路径分析。为此，本文在以往的研究基础上，选取关川河上游1957—2021年水文站点降水量、水土保持措施面积、径流量和输沙量数据，从流域水沙变化特征、水沙变化归因分析及水沙变化对降水和水土保持措施的响应过程（路径）三个方面进行研究和探讨[17-20]。

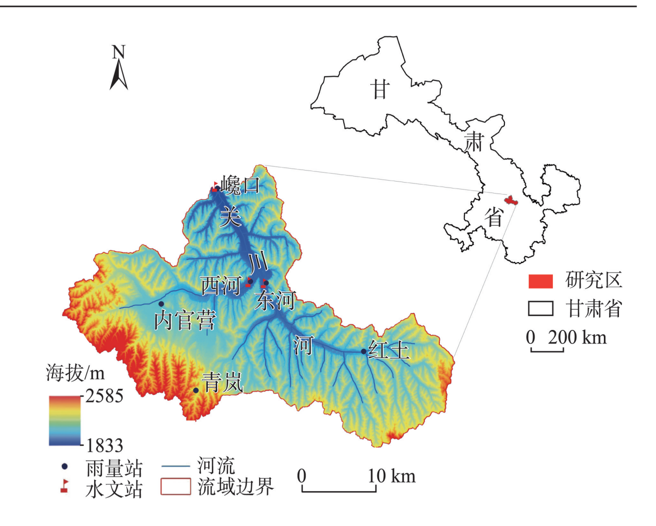


图1 关川河上游地理位置

Fig. 1 Geographical location of the upper Guanchuan River

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

关川河属于祖厉河的一级支流，位于甘肃省中部地区，关川河上游包含东河、西河两条支流，流域总面积1640.04 km²，其中包含东河流域面积791 km²，西河流域面积637 km²，两河在安定区城关镇汇合流入关川河主河道；东河与西河自安定区南边边界向北地势走低，侵蚀地表形成黄土丘陵、堆积河谷谷底等地貌类型，属半干旱黄土丘陵沟壑区；气候属温带季风型气候，气候干燥、干旱少雨，平均降水量仅413 mm且时空分布不均，主要集中于7—9月，年蒸发量1400 mm以上；土壤主要为黄绵土、灰钙土。研究区以水力侵蚀为主，1957—1980年年平均土壤侵蚀模数为4558.8 t·km^{-2}·a^{-1}。截至2021年底，累计治理水土流失总面积13.05×10^4 hm²，其中，兴修梯田为60963.01 hm²，水保林为37750 hm²，经济林为5380 hm²，人工种草为19835 hm²，封禁为6560 hm²。研究区先后设有巉口水文站（1956年建站—2000年）、东河（定西）水文站（1984年建站）和西河水文站（2001年建站）3个水文观测站、6个雨量观测站。水文站、雨量站点分布如图1所示。

1.2 数据来源及预处理

1957—2021年年降水量、径流量、输沙量数据由甘肃省水文水资源局提供。(1) 年降水量，研究区共设有东河、西河、内官营、红土、青岚、巉口6个雨量观测站，平均年降水量采用泰森多边形法计算。(2) 径流量和输沙量数据，1957—2000年径流量和输沙量数据来源于巉口水文站观测数据；2000—2021年的上述数据来源于东河、西河水文站观测数据。为最大程度消除巉口水文站迁移带来的影响，将原径流量与输沙量换算为年径流模数和输沙模数，作为基础分析数据。

水土保持措施实有量数据来源于甘肃省水土保持年报（1957—2021年）、安定区水土保持年报（1957—2021年）、“甘肃省水土保持综合治理措施效益研究（1979—2012年）”[21]等科研成果数据、安定区项目土地详查二调、三调数据、安定区林业局详查数据（2009年、2014年、2016年、2021年）及退耕还林工程（2000—2006年、2014—2021年）数据，利用上述资料修正得到各时间断面项目区实际水土保持措施面积。根据不同时段水土保持措施保存率，计算得到本研究区历年水土保持措施实际数量。

1.3 研究方法

(1) 采用非参数统计检验法Mann-Kendall（M-K）[22]分析关川河降水量、径流模数与输沙模数的序列变化趋势，并检验其变化的显著性。

(2) 采用Morlet小波进行小波分析，根据二维等值线闭合中心的正负值和小波系数的零点来判断降水量的增减性和突变性，其主要变化周期参照峰值来确定[23]。

(3) 采用线性回归分析降水量、水土保持措施面积与径流模数、输沙模数的关系。

(4) 采用结构方程模型（Structural Equation Modeling，SEM）对降水量、水土保持措施面积与径流模数、输沙模数之间的关系进行测度和分析，建立降水量和水土保持措施对径流模数、输沙模数关

系式，最后确定模型参数值[24-27]。结构方程模型包含结构方程和测量方程。结构方程用来测度潜变量之间的关系，测量方程用来测度观测变量与潜变量的关系。公式（1）和公式（2）为测量模型，公式（3）为结构模型。

$$X = \Lambda x \zeta + \delta \tag{1}$$

$$Y = \Lambda y \eta + \varepsilon \tag{2}$$

$$\eta = B\eta + \Gamma \xi + \zeta \tag{3}$$

式中：X为外因测量变量向量；Λx为X在ζ上的因子荷载矩阵；δ为测量误差；Y为内因测量变量向量；η为内因潜变量向量；Λy为Y在η上的因子荷载矩阵；ε为测量误差；η为内因潜变量向量；ξ为外因潜变量向量；B为内生潜变量间的回归系数；Γ为外因潜变量对内因潜变量之间的回归系数；ζ为测量误差。为确定模型拟合指标检验模型的拟合优度，选取比较拟合标准化估计值（*Estimate*）、标准误差（S. E.）、近似误差方根（*C. R. /T*）和P值4个指标来评价模型拟合效果[28]。模型的构建及拟合检验在AMOS 21和SPSS 26中进行。

2　结果与分析

2.1　水沙变化特征

2.1.1　径流模数年际变化特征　1957—2021年关川河上游年均径流模数为11466.71 $m^3 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$，最大值为45221.97 $m^3 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$（1967年），最小值为564.33 $m^3 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$（2011年），最大年径流模数是最小年径流模数的80.1倍。由径流模数线性拟合可知（图2a），年径流模数总体呈显著下降趋势（$P<0.05$）。1957—1967年径流模数呈增加趋势；1967—2021年径流模数逐年减少，其中，1999—2017年径流模数显著下降（$P<0.05$）。M-K突变检验表明（图2b），整体上径流呈现由多变少的演变，UF_k和UB_k交点位于1992年，说明径流模数的突变年份发生在1992年。

2.1.2　输沙模数年际变化特征　1957—2021年关川河上游年均输沙模数为2654.60 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$，最大输沙模数为11081.788 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$（1973年），最小输沙模数为1.33 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$（2016年）。区间内输沙模数呈波动减少趋势（图3a）。1957—1973年输沙模数呈增加趋势（图3a）；1973—2021年输沙模数呈减少趋势，其中1999—2021年输沙模数呈显著下降趋势（$P<0.05$）。同时由图3b可知，UF_k和UB_k的交点位于2003年，说明输沙模数在2003年发生突变。

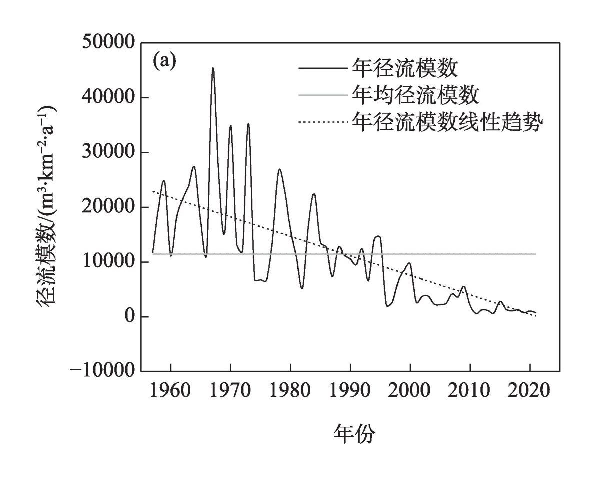
2.2　降水量特征

2.2.1　降水量年际变化　1957—2021年关川河上游面平均年降水量为413.0 mm，最大年降水量为715.6 mm（1967年），最小值为268.4 mm（1997年）（图4a），两者相差302.6 mm，最大年降水量是最小年降水量的1.73倍。降水量总体呈不显著下降趋势（$P>0.05$）。UF_k和UB_k交于2014年和2020年，表明降水量突变年为2014年和2020年（图4b）。

2.2.2　降水量周期性

（1）周期性

由图5a小波实部等值线分布可知，降水在不同时间尺度上存在不同周期丰枯循环交替的现象。降水量的周期变化存在3个时间尺度2~4 a、4~9 a和9~18 a。其中，2~4 a在小时间尺度上的降水振荡剧烈，周期变化规律较为清晰，信号表现稳定；4~9 a



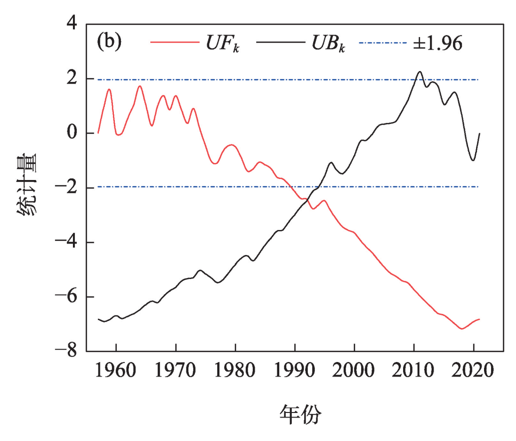


图2　径流模数年际分布（a）和M-K检验（b）

Fig. 2　Annual distribution of runoff modulus (a) and M-K test (b)

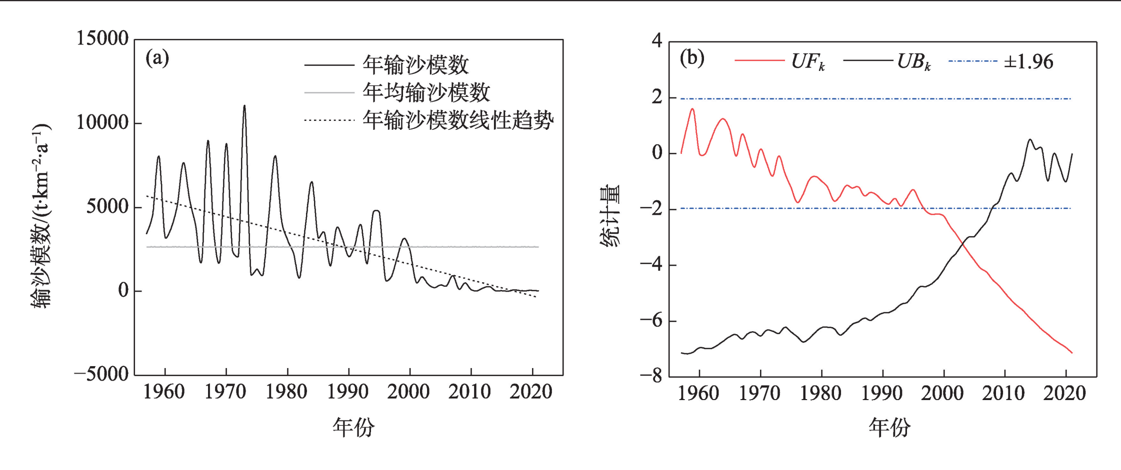


图3 输沙模数年际分布(a)和M-K检验(b)

Fig. 3 Annual distribution of sediment transport modulus (a) and M-K test (b)

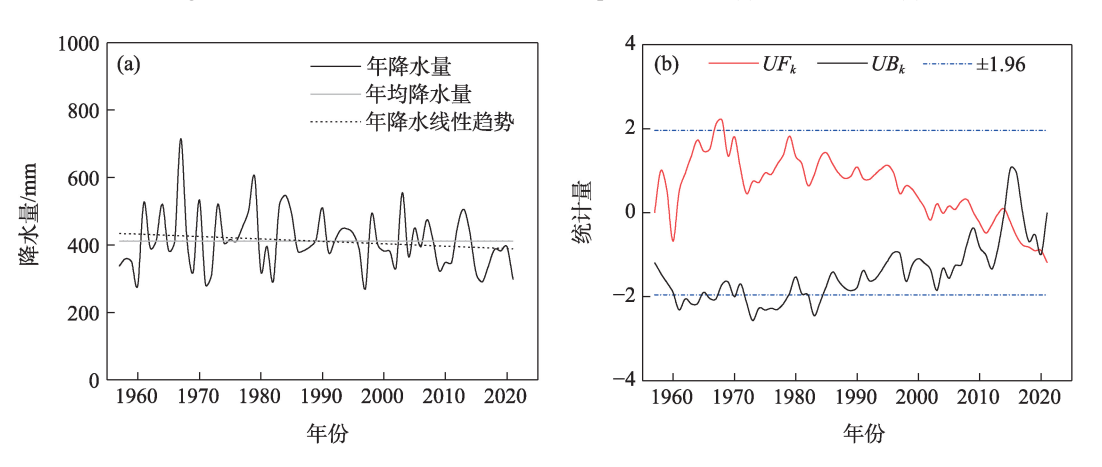


图4 降水量年际变化(a)和M-K检验(b)

Fig. 4 Interannual variation of precipitation (a) and M-K test (b)

时间尺度上周期均匀分布且具有显著全域化特征，存在11次完整的丰枯交替变化。2021年后正值实线没有完全闭合，说明2021年后降水将呈起伏减少趋势；9~18 a时间尺度上的降水振荡剧烈，且周期性变化具有局部性，仅在1957—1980年周期交替变化规律较清晰，此后规律消失，周期振荡趋于平缓。9~18 a时间尺度存在两次全域性丰枯交替变化，两个降水增大振荡重心分别为1967年和1977年，两个降水减小振荡中心分别为1960年和1973年。综上所述，研究区降水变化周期随不同时间尺度发生相应的变化规律，表现为大时间尺度与小时间尺度互相包含。

（2）小波方差检验

由小波方差图可知，每个方差峰值对应的周期尺度代表该时间尺度的主周期。时间序列存在5个波峰，包括3个显著和两个不显著峰值，不显著峰值可忽略不计，其中显著峰值依次对应3 a、6 a、13 a，时间尺度6 a对应峰值最大，表明6 a左右周期振幅最强，同时说明4~9 a时间尺度是降水量序列变化的第一主周期；时间尺度3 a对应第二峰值，表明2~4 a时间尺度周期振荡次之，是第二主周期；13 a对应第三峰值，周期振荡最弱，其效应可忽略不计。结合小波实部等值线图可以看出，在6 a对应的4~9 a时间尺度上，2021年小波系数实部等值线为负，表明2021年降水均处于下降期。由于6 a作为第一主周期的振荡强度大于第二及其他峰值，因此，未来短时期内降雨呈现减少的概率较大(图5b)。

2.3 水土保持措施特征

2.3.1 水土保持措施量和径流模数、输沙模数变化

随着水土保持措施和工程项目的不断实施，关川河上游各项水土保持措施数量不断增加，水土保持治理程度逐年提高。按照研究区水土保持措施实施力度的大小，大体分为三个阶段，分别是1957—1980年、1980—2000年和2000—2021年(图6a)。

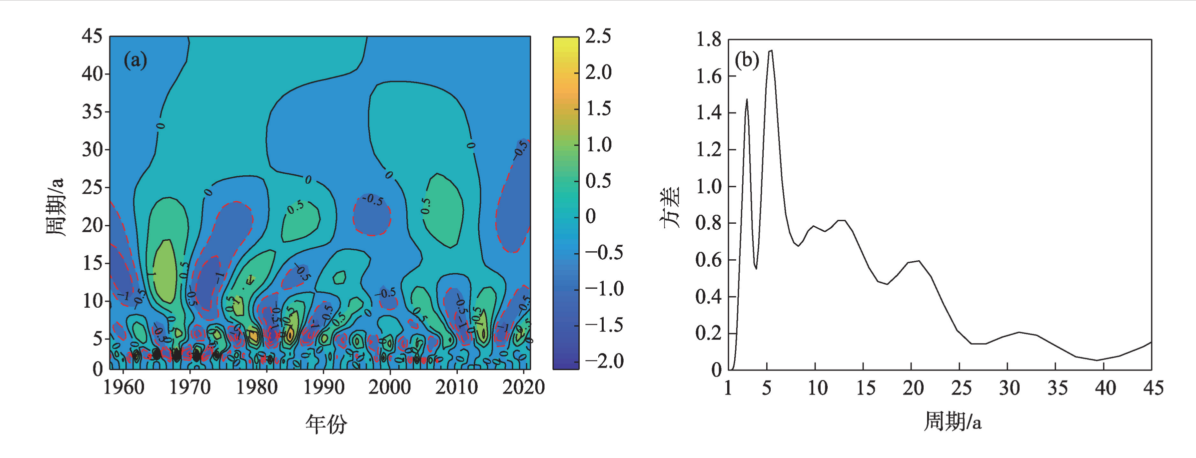


图5 年降水量小波系数实部等值线(a)和小波方差(b)

Fig. 5 Real part contour line (a) and wavelet variance (b) of annual precipitation wavelet coefficients

1957—1980年水土保持措施以梯田和造林为主,治理方法分散单一,1980年水土保持措施总面积达到21249.24 hm²,治理程度达12.96%,年治理率0.56%,主要水土保持措施为梯田,其面积达到14961.47 hm²,占水土保持总面积的70.41%。

1981—2000年为综合治理阶段,国家重点投入水土保持治理措施,实施了国家级、省级小流域综合治理、坡耕地建设、淤地坝建设工程,治理程度显著提高,2000年水土保持面积达92477.833 hm²,治理程度达56.39%,年治理率2.17%,其中梯田面积达42060.01 hm²,造林面积达32795.55 hm²,种草总面积达16202.26 hm²。

2001—2021年为平稳提高阶段,在原有基础上开展了大规模退耕还林(草)工程,2021年水土保持面积达13.05 ×10⁴ hm²,治理程度达79.56%,年治理率1.10%,其中梯田面积达60963.01 hm²,造林面积达43130 hm²,种草总面积达19835 hm²,封育面积达6560 hm²。随着水土保持措施面积的逐渐增加,径流模数和输沙模数呈波动减少趋势(图6b)。

2.4 影响水沙变化的主要因素

2.4.1 降水量与径流模数、输沙模数的关系 影响径流模数、输沙模数的主要因素是降水和以水土保持措施为主的人类活动。按照时间周期将降水量与径流模数、输沙模数的时间序列划分为3个时间段,第Ⅰ阶段1957—1980年,第Ⅱ阶段1981—2000年和第Ⅲ阶段2001—2021年。不同时段降水量、径流模数和输沙模数平均值见表1。由回归分析可知(表2),在第Ⅰ阶段径流模数、输沙模数对降水量变化响应强烈,趋势协同性强,相关系数较高,降水量和径流模数、输沙模数相关性均达到显著水平($P<0.01$),降水量对径流模数、输沙模数的决定系数R^2分别为0.471、0.302,第Ⅰ阶段径流模数和输沙模数平均值分别为19551.10 $m^3 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$和4558.80 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$;第Ⅱ阶段径流模数、输沙模数对降水量变化响应同

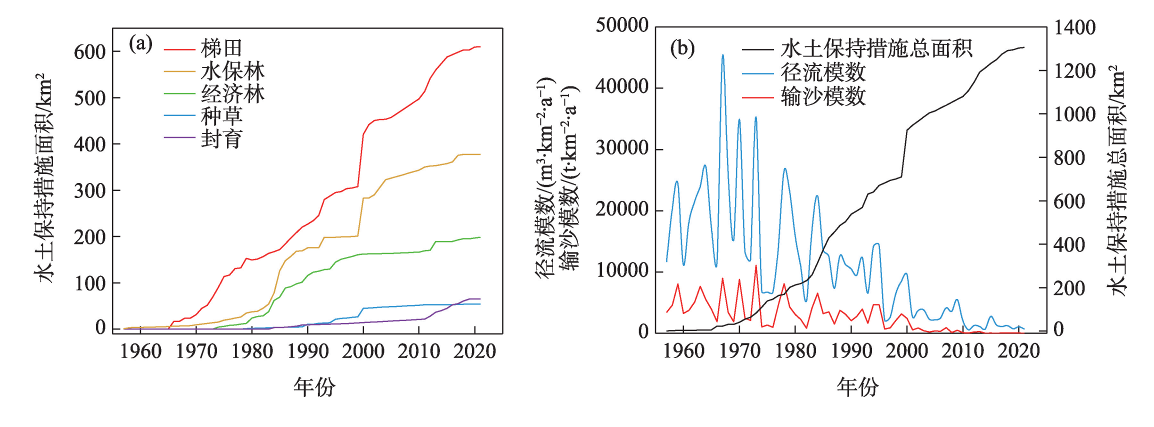


图6 各项水土保持措施数量变化(a)和径流模数、输沙模数变化(b)

Fig. 6 Changes in the quantity of various soil and water conservation measures (a) and changes in runoff modulus and sediment transport modulus (b)

表1 不同时段年降水量、径流模数和输沙模数平均值

Tab. 1 Average annual precipitation, runoff modulus, and sediment transport modulus at different time periods

特征值	Ⅰ(1957—1980年)	Ⅱ(1981—2000年)	Ⅲ(2001—2021年)
降水量/mm	424.1	418.5	389.9
径流模数/($m^3 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	19551.10	10465.21	2153.30
输沙模数/($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	4558.80	2896.92	247.64

表2 不同时段年降水量与径流模数、输沙模数相关关系

Tab. 2 The correlation between annual precipitation and runoff modulus and sediment transport modulus at different time periods

相关关系	时段(年份)	模型	R	R^2	F	Sig.
降水量(x_1)-径流模数(y_1)	Ⅰ(1957—1980年)	$y_1=64.69x_1-7885.79$	0.703	0.471	21.479	0.000**
	Ⅱ(1981—2000年)	$y_1=46.03x_1-8798.39$	0.674	0.454	14.976	0.001**
	Ⅲ(2001—2021年)	$y_1=2.13x_1+1306.18$	0.108	0.012	0.224	0.641
降水量(x_2)-输沙模数(y_2)	Ⅰ(1957—1980年)	$y_2=14.59x_2-1625.89$	0.549	0.302	9.511	0.005**
	Ⅱ(1981—2000年)	$y_2=12.59x_2-2374.10$	0.596	0.356	9.933	0.006**
	Ⅲ(2001—2021年)	$y_2=1.16x_2-204.98$	0.296	0.088	1.825	0.193
径流模数(y_1)-输沙模数(y_2)	Ⅰ(1957—1980年)	$y_2=0.25y_1-405.99$	0.881	0.775	75.951	0.000**
	Ⅱ(1981—2000年)	$y_2=0.29y_1-148.01$	0.941	0.885	138.919	0.000**
	Ⅲ(2001—2021年)	$y_2=0.14y_1-57.51$	0.718	0.515	20.165	0.000**

注:x_1为降水量(mm);x_2为水土保持措施面积(km^2);y_1为径流模数($m^3 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$);$y_2$为输沙模数($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$);$R$为相关系数;$R^2$为贡献系数;$F$为方差检验值;Sig.为显著性检验值。**为$P$<0.01。下同。

样强烈,趋势协同性强,但相比于第Ⅰ阶段相关系数较低,降水量和径流模数、输沙模数均达到显著水平(P<0.01),降水量对径流模数、输沙模数的决定系数R^2分别为0.454、0.356,第Ⅱ阶段径流模数和输沙模数平均值分别为10465.21 $m^3 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$和2896.92 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$;第Ⅲ阶段径流模数、输沙模数对降水量变化响应迅速减弱,趋势协同异化,降水量与径流模数、输沙模数相关性均未达到显著水平(P>0.05),降水量对径流模数、输沙模数的决定系数R^2分别为0.012、0.088,第Ⅲ阶段径流模数和输沙模数平均值分别为2153.30 $m^3 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$和247.64 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$。结果表明,在1957—2021年关川河上游流域降水对径流模数和输沙模数的影响随时间延长逐渐降低;径流模数与输沙模数相关关系协同性强,径流模数对输沙模数的决定系数R^2分别为0.775、0.885、0.515,均达到极显著水平(P<0.01)。

2.4.2 水土保持措施面积与径流模数、输沙模数的关系 在第Ⅰ阶段径流模数、输沙模数对水土保持措施面积变化响应都不强烈,未达到显著水平(P>0.05),水土保持措施面积对径流模数、输沙模数的决定系数R^2分别为0.041、0.026(表3);第Ⅱ阶段径流模数和输沙模数相对于第Ⅰ阶段对水土保持措施面积变化响应较强,但二者均未达到显著水平(P>0.05),水土保持措施面积对径流模数、输沙模数的决定系数R^2分别为0.158、0.033;第Ⅲ阶段径流模数、输沙模数对水土保持措施面积变化响应强烈,

表3 不同时段水土保持措施量和径流模数、输沙模数相关关系

Tab. 3 The correlation between the amount of soil and water conservation measures and the runoff modulus and sediment transport modulus at different time periods

相关关系	时段(年份)	模型	R	R^2	F	Sig.
水土保持措施面积(x_2)-径流模数(y_1)	Ⅰ(1957—1980年)	$y_1=-27.95x_2+21337.21$	0.202	0.041	0.939	0.343
	Ⅱ(1981—2000年)	$y_1=-10.29x_2+15914.73$	0.398	0.158	3.385	0.082
	Ⅲ(2001—2021年)	$y_1=-7.40x_2+10519.78$	0.673	0.454	15.771	0.001**
水土保持措施面积(x_2)-输沙模数(y_2)	Ⅰ(1957—1980年)	$y_2=-6.38x_2+4966.52$	0.160	0.026	0.579	0.455
	Ⅱ(1981—2000年)	$y_2=-1.445x_2+3661.78$	0.181	0.033	0.067	0.446
	Ⅲ(2001—2021年)	$y_2=-1.57x_2-2024.07$	0.717	0.514	20.059	0.000**

均达到极显著水平(P<0.01),水土保持措施面积对径流模数、输沙模数的决定系数R^2分别为0.454、0.514。径流模数和输沙模数平均值分别由1957—1980年的19551.10 $m^3 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$和4558.80 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$减少至2001—2021年的2153.30 $m^3 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$和247.64 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$。表明水土保持措施对径流模数和输沙模数的影响随时间延长逐渐增大,随着水土保持措施面积不断增加,水土流失得到有效控制。

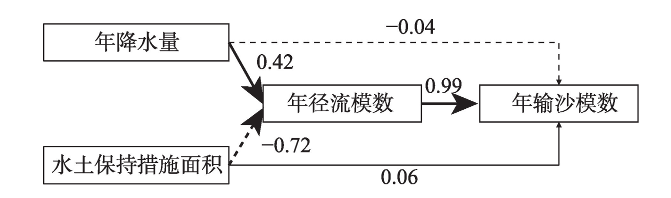
2.5 年降水量、水土保持措施面积对年径流模数、年输沙模数影响路径

2.5.1 *模型初步拟合检验* 采用结构方程模型(SEM)量化解释变量对响应变量的直接影响和间接影响,对年径流模数、年输沙模数与年降水量、水土保持措施面积的关系进行验证分析,初步拟合检验确定数据的科学性、可靠性。评价标准为:近似卡方值(CMIN)小于3,拟合度可接受;拟合优度指数(GFI)、相对拟合指数(NFI)、比较拟合指数(CFI)均大于0.8,拟合度很好;近似误差均方根(RMSEA)小于0.8,拟合度很好(表4)。各项指标均达到拟合标准,年降水量、年径流模数、年输沙模数、水土保持措施面积4项研究数据具有较好的拟合优度和较高的可靠性,模型适配良好。具体指标结果如下:

2.5.2 *水沙变化路径* 路径分析结果表明(表5),径流模数对输沙模数起到决定性作用,同时径流模数也受到降水与水土保持措施的影响。降水量对径流模数的直接影响显著,水土保持措施面积对输沙模数的直接影响显著,径流模数对输沙模数的直接影响显著,降水量与水土保持措施面积对输沙模数的间接影响显著,说明径流模数在降水量、水土保持措施面积和输沙模数之间具有部分中介作用。模型路径分析结果如下。

关川河上游1957—2021年降水量与径流模数的关系中,路径系数的标准化估计值为0.42,表明降水量每增加1个标准单位,径流模数增加0.42个标准单位;降水量与输沙模数的关系中,降水量对输沙模数的直接效应不显著;水土保持措施面积与径流模数的关系中,路径系数的标准化估计值为-0.72,表明水土保持措施面积每增加1个标准单位,径流模数减少0.72个标准单位;水土保持措施面积与输沙模数的关系中,水土保持措施面积对输沙模数的直接效应不显著;径流模数与输沙模数的关系中,路径系数的标准化估计值为0.99,表明径流模数每增加1个标准单位,输沙模数增加0.99个标准单位(图7)。

通过模型分析结果可知(图7、表6),降水量与水土保持措施均对径流模数的直接影响显著,对输沙模数的直接影响不显著。降水量对径流模数和输沙模数的影响较小,总效应分别为0.42和0.38,其中,直接效应分别为0.42、-0.04,间接效应分别为0、



注:实线表示正向影响;虚线表示负向影响;线宽表示影响大小。

图7 水沙变化形成的结构方程模型

Fig. 7 The structural equation model for the formation of water and sediment variations

表4 指标初步拟合检验

Tab. 4 Preliminary fitting test of indicators

拟合指标	CMIN	GFI	NFI	CFI	RMSEA
检验值	2.325	0.982	0.989	0.994	0.144

表5 路径关系检验

Tab. 5 Path relationship verification

变量间的关系	路径系数	P
降水量→径流模数	0.417	0.000***
水土保持措施面积→径流模数	-0.720	0.000***
径流模数→输沙模数	0.993	0.000***
降水量→输沙模数	-0.039	0.491
水土保持措施面积→输沙模数	0.062	0.402

注:***表示P<0.001时有极显著性。

表6 效应值计算

Tab. 6 Effect value calculation

自变量		因变量	
		径流模数	输沙模数
降水量	直接效应	0.42	-0.04
	间接效应	0	0.42
	总效应	0.42	0.38
水土保持措施面积	直接效应	-0.72	0.06
	间接效应	0	-0.71
	总效应	-0.72	-0.65

注:直接影响即自变量直接指向因变量的路径系数,间接影响即从自变量指向因变量路径系数的乘积,总影响即直接影响和间接影响的总和。

0.42；水土保持措施面积对径流模数和输沙模数的影响最大，总效应分别为−0.72和−0.65，其中，直接效应分别为−0.72、0.06，间接效应分别为0、−0.71。主要得益于水土保持综合治理，退耕还林还草等生态工程的实施使水土流失状况减轻。在降水量减少趋势不显著的情况下，径流模数和输沙模数呈现显著减少趋势。在水土保持措施、降水量、径流模数三种因素中径流模数对输沙模数起到决定性作用，由此可推断出水土保持措施是影响输沙模数的最重要因素，通过其对径流模数的直接影响间接决定输沙模数的降低。

3 讨 论

关川河上游流域降水量、径流模数和输沙模数变化趋势相同，但降水量减少趋势没有达到显著水平；而径流模数、输沙模数均呈极显著。刘强[29−30]、张富[31]、盛菲[32]等对不同流域水沙变化及其驱动因素进行研究，结果表明水沙关系受水土保持措施影响变化显著，水土保持措施等人类活动可以有效降低径流输沙量。王进[33]研究发现祖厉河流域降水量和人类活动对径流模数的贡献率分别为28.7%和71.3%，说明人类活动是重要影响因素，降水量是次要因素，这与本文的研究结果一致。本研究中降水量对径流模数的决定系数R^2由0.471降为0.012，水土保持措施面积对径流模数的决定系数R^2由0.041增为0.454；降水量对输沙模数的决定系数R^2由0.302降为0.088，水土保持措施面积对输沙模数的决定系数R^2由0.026增为0.514，表明随时间推移，水沙变化的主要影响因素由降水量变为水土保持措施。流域内水土保持治理程度逐年提高，由1980年的12.96%增至2021年的79.56%，有效降低了径流模数和输沙模数。路径分析结果表明，降水和水土保持措施对径流模数、输沙模数影响的路径是通过直接影响径流模数的变化，进而间接影响输沙模数的变化。从总效应看，水土保持措施面积对径流模数和输沙模数总效应分别为−0.72、−0.65，降水量对径流模数和输沙模数的总效应则分别为0.42、0.38，因而水土保持措施是影响水沙变化的主要因素，而降水只能作为次要因素。

气候和人类活动引发的流域水沙变化一直是学术界研究的热点问题。在众多影响水沙变化的气候影响因子和人类活动影响因子中，本研究仅对降水量、水土保持措施与产流产沙之间的关系进行了探讨，其他因素（温度、土壤、流域坡度、季节性气候变化、降雨强度等自然因素以及生产建设活动等人类活动）也会对水沙变化产生重要影响，在文中没有给予充分考虑，有待此后进一步深化研究。

4 结 论

（1）关川河上游流域径流模数和输沙模数在研究时段内变化同步性强，均呈显著减少趋势，其突变点分别在1992年和2003年；降水量在1957—2021年基本稳定，呈不显著减少趋势；水土保持措施面积总体随时间推移不断增加。

（2）径流模数、输沙模数对降水量变化的响应由强转弱，对水土保持措施面积的响应由弱变强。降水量对径流模数、输沙模数的相关系数R分别由0.703、0.549减小为0.108、0.296；水土保持措施面积对径流模数、输沙模数的相关系数R分为由0.202、0.160增加为0.673、0.717，说明水土保持措施面积对流域产流产沙影响逐渐增大。

（3）降水量和水土保持措施面积对径流模数存在直接影响，径流模数对输沙模数存在直接影响，降水量和水土保持措施通过直接影响径流模数间接影响输沙模数。降水量和水土保持措施对水沙变化影响的关键路径是"水土保持措施面积→径流模数"，其次是"水土保持措施面积→径流→输沙模数"。效应值分析结果为：水土保持措施面积对径流模数（−0.72）和输沙模数（−0.65）的总效应大于降水量对径流模数（0.42）和输沙模数（0.38）的总效应。表明水土保持措施面积大幅度增加是水沙关系变化的主要因素，而降水为次要因素。

参考文献（References）：

[1] 冯德锃, 吴栋栋, 赵玲玲, 等. 1952—2014年饶河流域水沙变化特征及影响因素[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(6): 53−59. [Feng Dezeng, Wu Dongdong, Zhao Lingling, et al. Analysis on characteristics and influence factors of runoff and sediment changes in the Raohe River basin from 1952 to 2014[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6): 53−59.]

[2] 保光裕, 乜虹, 王平, 等. 黄河上游河源区不同量级降水对径流变化的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 704−713. [Bao

Gangyu, Nie Hong, Wang Ping, et al. Research on effects of different precipitation magnitudes on runoff changes in the headwater region of the upper Yellow River[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 704-713.]

[3] 姚文艺, 高亚军, 张晓华. 黄河径流与输沙关系演变及其相关科学问题[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(4): 1-11. [Yao Wenyi, Gao Yajun, Zhang Xiaohua. Relationship evolution between runoff and sediment transport in the Yellow River and related scientific issues[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(4): 1-11.]

[4] 段雨佳, 何毅, 赵杰, 等. 人类活动对秦岭月河流域径流变化的影响分析[J]. 干旱区研究, 2023, 40(4): 605-614. [Duan Yujia, He Yi, Zhao Jie, et al. Analysis of impact of human activities on runoff changes in Yue River Basin of the Qinling Mountains[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(4): 605-614.]

[5] 高凛.《巴黎协定》框架下全球气候治理机制及前景展望[J]. 国际商务研究, 2022, 43(6): 54-62. [Gao Lin. Global climate governance mechanisms and prospects under the framework of the Paris Agreement[J]. International Business Research, 2022, 43(6): 54-62.]

[6] 姚春艳, 刘洪鹄, 刘竞, 等. 长江源区1980—2020年水沙变化规律[J]. 干旱区研究, 2023, 40(5): 726-736. [Yao Chunyan, Liu Honghu, Liu Jing, et al. Vatiation of runoff and sediment in the headwaters of the Yangtze River from 1980 to 2020[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(5): 726-736.]

[7] 赵阳, 余新晓. 黄土丘陵沟壑区典型流域气候和土地利用变化对径流泥沙产量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(3): 39-45. [Zhao Yang, Yu Xinxiao. Effects of climate variation and land use change on runoff-sediment yield in typical watershed of loess hilly-gully region[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(3): 39-45.]

[8] 宁珍, 高光耀, 傅伯杰. 黄土高原流域水沙变化研究进展[J]. 生态学报, 2020, 40(1): 2-9. [Ning Zhen, Gao Guangyao, Fu Bojie. Changes in steamflow and sediment load in the catchments of the Loees Plateau, China: A review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(1): 2-9.]

[9] Zheng H Y, Miao C Y, Wu J W, et al. Temporal and spatial variations in water discharge and sediment load on the Loess Plateau, China: A high-density study[J]. Science of the Total Environment, 2019, 666: 875-886.

[10] Zhang F, Xing Z S, Zhao C Y, et al. Characterizing long-term soil and water erosion and their interactions withvarious conservation practices in the semi-arid Zulihebasin, Dingxi, Gansu, China[J]. Ecological Engineering, 2017, 106: 458-470.

[11] Rustomji P, Zhang X P, Hairsine P B, et al. River sediment load and concentration responses to changes in hydrology and catchment management in the Loess Plateau region of China[J]. Water Resources Research, 2008, 44(7): 1-17.

[12] Zhang J J, Zhang X P, Li R, et al. Did streamflow or suspended sediment concentration changes reduce sediment load in the middle reaches of the Yellow River[J]. Journal of Hydrology, 2017, 546: 357-369.

[13] 廖建华, 许炯心, 杨永红. 黄土高原区高含沙水流发生频率空间分异及其影响因素[J]. 水科学进展, 2008, 19(2): 160-170. [Liao Jianhua, Xu Jiongxin, Yang Yonghong. Study of the spatial differentiation of hyperconcentrated flows frequency in the Losee Plateau[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(2): 160-170.]

[14] 赵娟. 基于VAR模型的典型流域水沙变化及其对降水与水土保持措施的动态响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019. [Zhao Juan. Impact of Soil and Water Conservation Measurements and Precipitation on River Runoff and Sediment Based on VAR Model in the Typical Area of Yellow River[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019.]

[15] 穆兴民, 李靖, 王飞, 等. 基于水土保持的流域降水-径流统计模型及其应用[J]. 水利学报, 2004, 49(5): 122-128. [Mu Xingmin, Li Jing, Wang Fei, et al. Rainfall-runoff statistical hydrological model based on soil and water conservation practices[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 49(5): 122-128.]

[16] 穆兴民, 王万忠, 高鹏, 等. 黄河泥沙变化研究现状与问题[J]. 人民黄河, 2014, 36(12): 1-7. [Mu Xingmin, Wang Wanzhong, Gao Peng, et al. Progress and discussion on sediment load variation research of the Yellow River[J]. Yellow River, 2014, 36(12): 1-7.]

[17] 赵传普, 徐学选, 陈天林, 等. 关川河流域土地利用变化对径流的影响[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 83-87. [Zhao Chuanpu, Xu Xuexuan, Chen Tianlin, et al. Impact of land use changes on the streamflow in Guanchuanhe Watershed[J]. Research on Soil and Water Conservation, 2015, 22(3): 83-87.]

[18] 张建云, 刘九夫, 金君良, 等. 青藏高原水资源演变与趋势分析[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1264-1273. [Zhang Jianyun, Liu Jiufu, Jin Junliang, et al. Evolution and trend of water resources in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(11): 1264-1273.]

[19] Gao Z L, Fu Y L, Li Y H, et al. Trends of streamflow, sediment load and their dynamic relation for the catchments in the middle reaches of the Yellow River over the past five decades[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(9): 3219-3231.

[20] Zhang J J, Zhang X P, Li R, et al. Did streamflow or suspended sediment concentration changes reduce sediment load in the middle reaches of the Yellow River[J]. Journal of Hydrology, 2017, 546: 357-369.

[21] 张富, 姚进忠, 雷升文, 等. 甘肃省水土保持综合治理措施效益研究[M]. 郑州, 黄河水利出版社, 2014: 218-220. [Zhang Fu, Yao Jinzhong, Lei Shengwen, et al. Study on the Benefits of Comprehensive Management Measures for Soil and Water Conservation in Gansu Province[M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2014: 218-220.]

[22] 甄英, 杨珊, 何静, 等. 基于M-K检验法与R/S法的宜宾市降水量分析[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2017, 40(3): 392-

397. [Zhen Ying, Yang Shan, He Jing, et al. Analysis of precipitation in Yibin city based on M-K test and R/S method[J]. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science), 2017, 40(3): 392-397.]

[23] 谢智博, 穆兴民, 高鹏, 等. 基于R/S和Morlet小波分析的北洛河上游径流变化特征[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 139-144. [Xie Zhibo, Mu Xingmin, Gao Peng, et al. Variation characteristics of runoff in the upper reaches of Beiluo River based on R/S and Morlet wavelet analysis[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(2): 139-144.]

[24] Klaus F, Axel M, Hannes S. Multiscale change point inference[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology), 2014, 3: 495-580.

[25] Fabian R, Sebastian S, Martin S, et al. Controls on runoff generation along a steep climatic gradient in the Eastern Mediterranean [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2017, 9: 18 - 33.

[26] 委霞. 基于结构方程模型的福寿林场三种典型林分健康评价[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021. [Wei Xia. Health Evaluation of three Typical Forest Stands in Fushou Forest Farm Based on Structural Equation Model[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2021.]

[27] 萨如拉, 王子瑞, 滑永春, 等. 基于结构方程模型的大兴安岭北部天然林森林生态系统恢复能力评价研究[J/OL]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 1-11. [2022-12-01]. [Sa Rula, Wang Zirui, Hua Yongchun, et al. Evaluating forest ecosystem restoration ability of natural forest in northern greater khingan Mountains by a structural equation model[J/OL]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2022, 1-11. [2022-12-01].]

[28] 翟宏堃, 李强, 魏晓薇. 结构方程模型统计检验力分析: 原理与方法[J]. 心理科学进展, 2022, 30(9): 2117-2143. [Zhai Hongkun, Li Qiang, Wei Xiaowei. Power analysis in structural equation modeling: Principles and methods[J]. Advances in Psychological Science, 2022, 30(9): 2117-2143.]

[29] 刘强, 穆兴民, 赵广举, 等. 延河流域水沙变化及其对降水和土地利用变化的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(7): 129-135. [Liu Qiang, Mu Xingmin, Zhao Guangju, et al. Runoff and sediment changes and their responses to precipitation and land use change in the Yan River Basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(7): 129-135.]

[30] 刘强, 李苗苗, 罗霞飞, 等. 黄河中游河龙区间水沙变化特征及其对降水和人类活动的响应[J]. 天水师范学院学报, 2021, 41(5): 22-28. [Liu Qiang, Li Miaomiao, Luo Xiafei, et al. Variation characteristics of runoff and sediment in the Helong region of the middle Yellow River and its response to climate change and human activities[J]. Journal of Tianshui Normal University, 2021, 41(5): 22-28.]

[31] 张富, 宁建国, 景亚安, 等. 关川河流域水土保持质量效益监测及成果分析[J]. 中国水土保持, 1992, 13(2): 21-25, 65-66. [Zhang Fu, Ning Jianguo, Jing Ya'an, et al. Quality-effects Monitoring of the soil conservation works and analysis of the monitoring data in Guan-chuan watershed[J]. Soil and Water Conservation in China, 1992, 13(2): 21-25, 65-66.]

[32] 盛菲, 刘士余, 余敏琪, 等. 不同时间尺度濂水流域水沙变化及其驱动因素分析[J]. 水土保持学报, 2023, 37(3): 201-207, 217. [Sheng Fei, Liu Shiyu, Yu Mingqi, et al. Analysis of runoff and sediment variation and its driving factors in Lianshui Watershed at different time scales[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(3): 201-207, 217.]

[33] 王进. 气候变化对半干旱区流域径流影响的分析研究[J]. 中国水利, 2011, 62(3): 18-19. [Wang Jin. Analysis of the impact of climate change on runoff in semi-arid watersheds[J]. China Water Resources, 2011, 62(3): 18-19.]

Characteristics of water and sand changes in the upper Guanchuan River and its response to precipitation and water conservation measures

WANG Xiaoyu[1], MA Rui[1], ZHANG Fu[1], HU Yanting[1], WANG Lingli[2], JIANG Chengyang[3], CHEN Su'e[1]

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. College of Forestry Engineering, Gansu Forestry Vocational and Technical College, Tianshui 741000, Gansu, China; 3. Gansu Zhifu Ruida Ecological Environment Engineering Co. Ltd., Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: In order to further explore the influence of precipitation and soil and water conservation measures on runoff sediment, and to gain an in-depth understanding of the driving factors of water and sand changes in small and medium-sized rivers of the Yellow River, M-K test, Morlet wavelet, linear regression and structural equation modeling were used to study the changes in precipitation and the area of soil and water conservation measures in the upper Guanchuan River from 1957−2021, as well as their the mechanism and process of action were studied. The results showed that annual precipitation showed a non-significant decreasing trend (P >0.05), runoff modulus and sand transport modulus showed a significant decreasing trend (P<0.05), and the area of soil and water conservation measures showed an increasing trend. The response of runoff modulus and sand transport modulus to precipitation got weakened, and the response to soil and water conservation measures was gradually strengthened; the key path of precipitation and soil and water conservation measures affecting the change of water and sand was "area of soil and water conservation measures→runoff modulus", followed by "area of soil and water conservation measures→runoff→sand transport modulus", then "precipitation→runoff modulus", and finally "precipitation→runoff modulus→sand transport modulus". The total effect of precipitation on water and sand change is 0.42 and 0.38 respectively, while the total effect of soil and water conservation measures on water and sand change is −0.72 and −0.65 respectively. The main factor affecting water and sand change in the watershed is the area of soil and water conservation measures, and the secondary factor is the amount of precipitation.

Keywords: changes in water and sediment; soil and water conservation measures; structural equation model; upper Guanchuan River